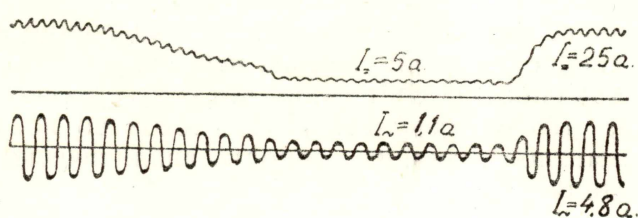


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ВТОРИЧНОГО ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С СЕРДЕЧНИКАМИ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

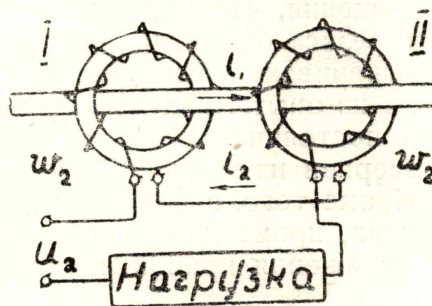
К. К. РЯЗАНЦЕВ

Наличие переходного процесса в цепи постоянного тока, в которую включен своей первичной обмоткой измерительный трансформатор, оказывает влияние на форму кривой его вторичного тока. Рассматривая осциллограммы обоих токов, легко заметить, что между последними существует прямая пропорциональность (фиг. 1). Так, например, мгновенные значения вторичного тока в одни и те же моменты, отсчитанные от начала периодов, следующих один за другим, будут возрастающими или убывающими в зависимости от характера изменения первичного тока.

Выявление закономерности, связывающей мгновенные значения постоянного и переменного токов, имеет несомненный интерес, поэтому ниже делается попытка осветить этот вопрос.



Фиг. 1



Фиг. 2

Обратимся к схеме измерительного трансформатора постоянного тока (фиг. 2), имеющего четыре обмотки, попарно связанные между собой магнитными потоками. Первичные обмотки представляют собой шину, проходящую внутри дросселей насыщения, входящих в состав трансформатора. То обстоятельство, что первичная обмотка состоит только из одного витка, позволяет не учитывать отдачу энергии из вторичной цепи в первичную, так как наводимая в шине э. д. с. незначительна и не может создать заметных токов.

Вторичная цепь трансформатора питается от сети переменного тока, в которой напряжение изменяется по закону синуса.

Если принять, что первичные обмотки обоих дросселей включены согласно, то следует считать вторичные обмотки соединенными встречно. Поэтому в течение каждой половины периода магнитные потоки, создаваемые постоянным и переменным токами в одном из сердечников, совпадают по направлению, в другом в то же время они противоположны.

Учитывая знаком минус в скобках встречное включение обмоток можем написать для вторичной цепи следующее уравнение:

$$u_2 = i_2 r - (e_L^I - e_L^{II}) - (e_M^I - e_M^{II}) - e_{L_n}, \quad (1)$$

в котором

e_L^I, e_L^{II} — э. д. с. самоиндукции, наводимые во вторичных обмотках дросселей током i_2 ;

e_M^I, e_M^{II} — э. д. с. взаимной индукции, возникающие во вторичных обмотках дросселей вследствие изменения первичного тока i_1 ;

$e_{L_n} = -L_n \frac{di_2}{dt}$ — э. д. с. самоиндукции нагрузки;

r — сумма активных сопротивлений вторичной цепи.

После небольшого преобразования получим:

$$u_2 = i_2 r - (e_L^I + e_L^{II}) - (e_M^I + e_M^{II}) + L_n \frac{di_2}{dt}. \quad (2)$$

Результирующие э. д. с. каждой обмотки

$$e^I = e_L^I + e_M^I; \quad e^{II} = e_L^{II} + e_M^{II}$$

являются следствием изменения потокосцеплений вторичных обмоток под действием первичного и вторичного токов, и поэтому можно написать

$$e^I = - \frac{d\Psi^I}{dt} = -w_2 S \frac{dB^I}{dt}, \quad (3)$$

$$e^{II} = - \frac{d\Psi^{II}}{dt} = -w_2 S \frac{dB^{II}}{dt}. \quad (4)$$

Здесь

w_2 — число витков вторичной обмотки;

S — сечение сердечника;

B^I и B^{II} — мгновенные значения индукций в сердечниках.

Подставив в (2) выражения (3) и (4), а также имея в виду, что

$$u_2 = U_M \sin(\omega t + \varphi),$$

где φ — фазовый угол в момент перехода тока i_2 через нулевое значение, имеем:

$$U_M \sin(\omega t + \varphi) = i_2 r + w_2 S \frac{dB^I}{dt} - w_2 S \frac{dB^{II}}{dt} + L_n \frac{di_2}{dt}. \quad (5)$$

Для доведения решения до конца приходится [пренебречь активным сопротивлением и гистерезисом. Даже с таким упрощением, как это будет видно из дальнейшего, выражение для подсчёта мгновенных значений вторичного тока будет достаточно сложным. Кроме того, будем полагать, что при принятых допущениях

$$\varphi = -\frac{\pi}{2}.$$

Если учесть все вышесказанное, то уравнение (5) примет вид:

$$U_M \cos \omega t = \omega_2 S \frac{dB^I}{dt} - \omega_2 S \frac{dB^{II}}{dt} + L_n \frac{di_2}{dt}.$$

После разделения переменных и интегрирования получим:

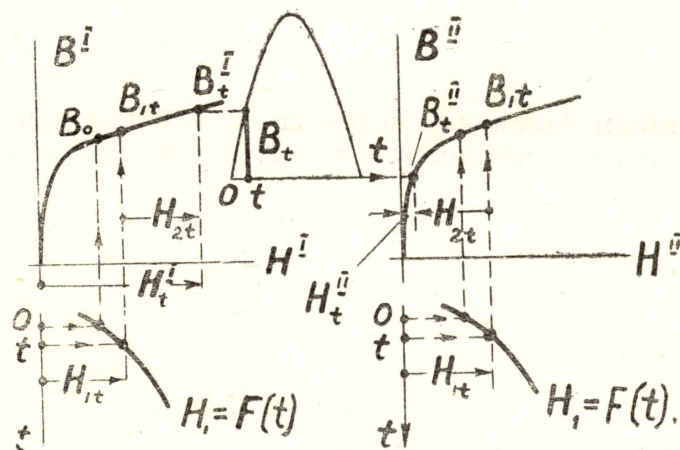
$$B_M \sin \omega t \Big|_0^t = B^I \Big|_{B_0^I}^{B_t^I} - B^{II} \Big|_{B_0^{II}}^{B_t^{II}} + k i_2 \Big|_0^t,$$

где

$$B_M = \frac{U_M}{\omega \omega_2 S},$$

$$k = \frac{L_n}{\omega_2 S},$$

B_0^I, B_0^{II} — значения индукций в сердечниках в момент ближайшего перехода тока i_2 через нулевое значение. Если не учитывать гистерезис, то следует их считать равными по величине и знаку, так как они определяются только значениями удельных ампервитков постоянного тока.



Фиг. 3

B_t^I, B_t^{II}, i_t — мгновенные значения в момент t индукций и вторичного тока.

Подставив пределы, найдём:

$$B_M \sin \omega t = B_t^I - B_t^{II} + k i_{2t}. \quad (6)$$

Индукции B_t^I и B_t^{II} являются функциями мгновенных значений результирующих напряженностей поля каждого дросселя (фиг. 3):

$$H_t^I = H_{1t} + H_{2t}, \quad (7)$$

$$H_t^{II} = H_{1t} - H_{2t}. \quad (8)$$

Связь между результирующими напряженностями поля и индукциями дается аналитическими выражениями характеристики намагничивания, например,

$$B = \frac{H}{a + bH} \quad (9)$$

или

$$H = \alpha \operatorname{sh} \beta B. \quad (10)$$

Заменяя в первом из них H правыми частями выражений (7) и (8) и подставляя результаты в (6), найдём, что

$$B_M \sin \omega t = \frac{H_{1t} + H_{2t}}{a + b(H_{1t} + H_{2t})} - \frac{H_{1t} - H_{2t}}{a + b(H_{1t} - H_{2t})} + k \frac{l_{cp}}{\omega_2} H_{2t},$$

откуда

$$H_{2t} = u + \frac{1}{9u} (3e + 3n + d^2) + \frac{1}{3} d, \quad (11)$$

причём

$$u = \sqrt{-q + \sqrt{q^2 + p^3}},$$

$$q = \frac{1}{2} dn - \frac{1}{6} (e + n)d - \frac{1}{27} d^3,$$

$$p = -\frac{1}{9} (3e + 3n + d^2),$$

$$d = \frac{\omega_2^2 S}{L_H \cdot l_{cp}} B_M \sin \omega t,$$

$$e = -\frac{2a\omega_2^2 S}{L_H \cdot l_{cp} \cdot b^2},$$

$$n = \left(\frac{a + bH_1}{b} \right)^2.$$

Зная H_{2t} , определим мгновенное значение вторичного тока:

$$i_{2t} = \frac{l_{cp}}{\omega_2} H_{2t}, \quad (12)$$

где l_{cp} — длина средней индукционной линии.

Если характеристика намагничивания выражена в виде

$$H = \alpha \operatorname{sh} \beta B,$$

то индукция будет равна

$$B = \frac{1}{\beta} \operatorname{Arsh} \frac{H}{\alpha}. \quad (13)$$

Приняв во внимание выражения (7) и (8) и подставив их поочередно в (13), можно написать, что

$$B_t^I = \frac{1}{\beta} \operatorname{Arsh} \frac{H_{1t} + H_{2t}}{\alpha}, \quad (14)$$

$$B_t^{II} = \frac{1}{\beta} \operatorname{Arsh} \frac{H_{1t} - H_{2t}}{\alpha}. \quad (15)$$

Учитывая (6), (14) и (15), имеем

$$B_M \sin \omega t = \frac{1}{\beta} \left(\operatorname{Arsh} \frac{H_{1t} + H_{2t}}{\alpha} + \operatorname{Arsh} \frac{H_{1t} - H_{2t}}{\alpha} \right) + k \frac{l_{cp}}{\omega_2} H_{2t}. \quad (16)$$

Ввиду сложности этого уравнения приходится не принимать во внимание индуктивность нагрузки L_n . Тогда оно значительно упрощается и его решение будет следующим

$$H_{2t} = \left[-\frac{g}{2} + \left(\frac{g^2}{4} - h \right)^{1/2} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Здесь

$$g = \alpha^2 - 2H_{1t}^2 \left[1 + \frac{2}{sh^2(\beta B_M \sin \omega t)} \right],$$

$$h = \alpha 2H_{1t}^2 + H_{1t}^4 - \left[\frac{\alpha^2 sh(\beta B_M \sin \omega t)}{2} \right]^2.$$

Определение мгновенных значений вторичного тока по выражениям (11), (12) и (17) связано с длительными подсчётами. Для избежания этого предлагается простой графический способ, основанный на использовании уравнения (6). Чтобы выяснить эту возможность, предварительно рассмотрим фиг. 3, на которой показана связь, существующая между мгновенными значениями напряженностей поля и индукций без учёта нагрузки.

Пусть в момент времени t существует мгновенное значение напряженности поля H_{1t} , создаваемой первичным током i_{1t} и легко находимой по заданной кривой $H_1 = F(t)$. На характеристиках намагничивания H_{1t} соответствуют индукции B_{1t} . Если в тот же момент по вторичным обмоткам протекает ток i_{2t} , то мгновенные значения индукций B_{1t}^I и B_{1t}^{II} могут быть определены графически по результирующим напряженностям, находимым по выражениям (7) и (8). В том случае, когда $L_n = 0$, разность индукций должна изменяться по закону синуса, и поэтому горизонталь, проведённые через точки B_{1t}^I и B_{1t}^{II} , отсекают на синусоиде $B_M \sin \omega t$ ординату B_t , соответствующую времени t . Это даёт возможность найти связь между H_{2t} и t .

Чтобы облегчить построение, нужно повернуть характеристику второго дросселя на 180° и совместить точки B_{1t} (фиг. 4). Затем, для учёта индуктивности нагрузки, провести под углом к верхнему участку характеристики через точку B_{1t} пунктирную прямую с тем расчётом, чтобы вертикальные отрезки прямых, заключённые между ней и верхней характеристикой, представляли бы собой последний член уравнения (6):

$$ki_{2t} = k \frac{l_{cp}}{w_2} H_{2t}.$$

Далее, взяв циркулем на синусоиде величину $B_t = B_M \sin \omega t$, следует найти на чертеже положение, в котором отрезок B_t вписывается, располагаясь вертикально, между нижней характеристикой и пунктирной прямой. Расстояние от вертикали B_t до вертикали, проходящей через точку B_{1t} , даст в масштабе величину напряженности поля

$$H_{2t} = i_{2t} \frac{w_2}{l_{cp}}.$$

Зная H_{2t} и момент t , получим возможность построить одну точку кривой $H_{2t} = f(t)$, которая в масштабе представляет собой кривую $i_{2t} = f_1(t)$.

Для построения полной кривой нужно многократно повторить описанные выше действия, чтобы получить достаточное количество точек. При этом необходимо совмещать точки B_{1t} обеих характеристик, причем t является текущей координатой, т. е. каждый раз строить одну из характеристик на новом месте.

Чтобы избежать повторных построений, можно вычертить одну характеристику на миллиметровой бумаге, а вторую—на кальке или сделать шаблон из целлулоида. Тогда совмещение точек достигается путем простого перемещения кальки или шаблона.

В заключение отметим, что кривые изменения вторичного тока, построенные для опытного образца трансформатора, по своей форме и размерам близко подходят к осциллограммам, снятым с помощью шлейфного осциллографа. В качестве характеристики намагничивания использовалась безгистерезисная кривая, близкая к средней кривой намагничивания, абсциссы которой равны полусуммам соответствующих абсцисс предельной петли гистерезиса.
